

SLUTRAPPORT

Utveckling av radiobaserad mätteknik för schaktugnar



Författare och resultat: Patrik Ottoson, Daniel Andersson, Radarbolaget

Projekt: 2015-02519 Syrgasanvändning vid cement och kalktillverkning samt utveckling av radiobaserad mätteknik för schaktugnar, WP2

Finansiär och industribidrag: Vinnova och Nordkalk

Innehåll

Sammanfattning	3
Abstract	4
1. Bakgrund	5
2. Schaktugnar	5
3. Metod och material	6
3.1 Mätmetod	6
3.2 Digital radiomätutrustning.....	7
3.3 Sensor i projektet.....	8
4. Laborieförsök	8
4.1 Installation	8
4.2 Resultat	9
4.3 Samband laboratorieugn	12
5. Fullskaleförsök	13
5.1 Installation	13
5.2 Radiovåg och signalbehandling.....	14
5.3 Resultat	15
5.4 Samband schaktugn	17
6. Slutsatser och framtid	20
6.1 Mätningar.....	20
6.2 Samband	21
6.3 Framtid.....	22

Sammanfattning

Det finns behov av jämnare och högre kvalitet vid produktion av bränd kalk. I så kallade schaktugnar omvandlas kalksten/kalciumkarbonat (CaCO_3) till bränd kalk/kalciumoxid (CaO). Under denna process frigörs koldioxid (CO_2). Kvaliteten på bränd kalk definieras som mängden frigjord koldioxid (CO_2), den procentuella mängden kalciumoxid (CaO) och den procentuella mängden kvarvarande kalciumkarbonat (CaCO_3). Frigörs för lite koldioxid så skapas för lite kalciumoxid och det finns för mycket kvarvarande kalciumkarbonat.

UWB- eller bredbandig radiomätutrustning skickar ut radiovågor inom ett brett frekvensspektrum. Inom detta projekt har en utrustning med en centerfrekvens på 2 GHz använts. Frekvensintervallet var 1–3 GHz. Inom ramen för ett annat projekt har en digital radarsensor (DiRP, Digital Radar Processor) utvecklats. Med denna nya enhet kan högre signal-till-brus-förhållande, högre förstärkning och eliminering av läcksignaler erhållas. Denna enhet är tänkt att användas i en eventuell förlängning av detta projekt. Radiomätutrustningen registrerar en signal, från vilken längd och amplitud kan mätas. Från den mätta längden och den kända fysiska längden, t.ex. bredden på en schaktugn, så kan den så kallade dielektricitetskonstanten beräknas. Denna konstant är uttryck för hur mycket signalen fördröjs beroende på mediets egenskaper.

Dielektricitetskonstanten minskar med ökad kalcinering (aktivt CaO) vid konstant temperatur. Vid ökad temperatur minskar amplituden och dielektricitetskonstant ökar. Förändringen i de dielektriska egenskaperna påverkas sålunda av kalcinering (aktivt CaO) och temperatur om man antar att densitet, ingående material och fraktionsstorlek är lika.

Det genomfördes två olika tester för att undersöka sambanden mellan de dielektriska egenskaperna och kalcineringen. Första testet genomfördes på en laboratorieugn där vikt (kalcinering) och temperatur registrerades. Vikt och kalcinering ansågs vara direkt proportionerliga mot varandra. Andra testet genomfördes på Nordkalks schaktugn i Storugns, med främsta syfte att undersöka möjligheterna att installera utrustning och mäta i industriell miljö. I och med att mätdata erhöles för fem veckor så har även dessa data granskats och modellerats.

I nuvarande ugnsovervaknings- och styrsystem för Nordkalks schaktugn i Storugns registreras väggtemperatur. Därutöver görs kemiska analyser var fjärde timme för att övervaka kalcineringsgraden. Dagens ugnsovervaknings- och styrsystem fallerar emellanåt beroende på att mätningarna inte görs direkt i tid och på plats på stenmaterialet. Därför är det inte möjligt att direkt korrigera värmingstid och temperatur under pågående process i relation till kvalitetsvariationer. Det finns också en samplingsproblematik, problem med tidssynkronisering och återkopplingsproblematik. Projektet har visat att det går att ta fram samband utifrån de dielektriska egenskaperna för bestämning av kalcineringen med $\sigma=0,5-1$ procentenheter. Noggrannheten kan öka med mer data, noggrannare referensmätningar, bättre modellering och längre mätperioder.

Radiomätningarna fungerade bra och det går att ta fram ett samband mellan de kemiska reaktionerna (aktivt CaO) och de dielektriska egenskaperna. I en skarp installation ska en ny radiomätutrustning användas (DiRP, Digital Radar Processor). Denna kommer att ge robustare mätning. Det kommer dock att behövas radiomätningar och referensmätning (temperatur och aktivt CaO) under flera månader för att finkalibrera systemet. Radarbolaget föreslår en skarp installation av radiomätutrustningen på Nordkalks schaktugn i Storugns.

Abstract

There is a need of higher and more consistent quality in the production of lime. In so-called shaft furnaces, limestone / calcium carbonate (CaCO_3) is converted to the lime / calcium oxide (CaO). During this process, the carbon dioxide (CO_2) is released. The quality of the lime is defined as the amount of released carbon dioxide (CO_2), the percentage of calcium oxide (CaO), and the percentage of remaining calcium carbonate (CaCO_3). If there is not enough carbon dioxide released, there is too little calcium oxide created and there is too much calcium carbonate left.

UWB or wideband radio measurement equipment transmits radio waves over a wide frequency spectrum. Within this project, an equipment with a center frequency of 2 GHz was used. Frequency range was 1-3 GHz. In another project, a digital radar sensor (DiRP, Digital Radar Processor) was developed. With this new device, higher signal-to-noise ratio, higher gain, and avoidance of leakage signals can be obtained. This device is intended for use in a possible extension of this project. The radio measurement device registers a signal, from which distance and amplitude can be measured. From the measured distance and the known physical distance, e.g. the width of a shaft furnace, the so-called dielectric constant can be calculated. This constant is an expression of how much the signal is delayed depending on the medium's characteristics.

The dielectric constant decreases with increasing calcination (active CaO) at constant temperature. Amplitude decreases and dielectric constant increases with increasing temperature. Thus, the dielectric properties are affected of calcination (active CaO) and temperature if density, raw material, and fraction sizes are the same.

Two different tests were performed to examine the relationships between the dielectric properties and calcination. The first test was performed on a laboratory furnace where weight (calcination) and the temperature were recorded. Weight and calcining were directly proportionate to each other. Second test was performed on Nordkalk's shaft furnace in Storugns, with the objective to explore the possibility of installing equipment and measuring in an industrial environment. Since measurement data were obtained for five weeks, these data were also examined and modeled.

In current furnace control, the wall temperature is recorded. In addition, chemical analyses every four hours for monitoring of the calcination. Today's furnace control systems fail from time to time depending on the fact that the measurements are not made directly in time and in place of the stone material. Therefore, it is not possible to directly correct heating time and temperature during the process in relation to quality variations. There also exist problems with sampling, time synchronization, and feedback. The project has shown that it is possible to develop relationships from the dielectric properties for the determination of the calcination with $\sigma = 0.5-1$ percentage points. Accuracy can be improved with more data, more accurate reference measurements, better modeling, and longer measurement periods.

Radio measurements worked well and it is possible to establish a correlation between the chemical reactions (active CaO) and the dielectric properties. In an actual installation, a new radio measurement equipment will be used (DiRP, Digital Radar Processor). This will provide more robust measurement. However, it will require radio measurements and reference measurement (temperature and active CaO) for several months to calibrate the system. Radarbolaget proposes an actual installation of radio measurement device on Nordkalk's shaft furnace in Storugns.

1. Bakgrund

Det finns behov av jämnare och högre kvalitet vid produktion av bränd kalk. I så kallade schaktugnar omvandlas kalksten/kalciumkarbonat (CaCO_3) till bränd kalk/kalciumoxid (CaO). Under denna process frigörs koldioxid (CO_2). Kvaliteten på bränd kalk definieras som mängden frigjord koldioxid (CO_2), den procentuella mängden kalciumoxid (CaO) och den procentuella mängden kvarvarande kalciumkarbonat (CaCO_3). Frigörs för lite koldioxid så skapas för lite kalciumoxid och det finns för mycket kvarvarande kalciumkarbonat.

Kalcineringsprocessen styrs i princip av fem faktorer: temperatur, uppvärmningstid, ingående stenkvalitet, storlek på sten samt koldioxidmättad ugnsatmosfär och tryck. Med ökad temperatur och värmningstid så ökar mängden frigjord koldioxid och den procentuella mängden skapad kalciumoxid. Det är framför allt ojämn ingående stenkvalitet som ger ojämn kvalitet vid produktion av bränd kalk. Denna variation i ingående stenkvalitet kan kompenseras genom att ändra temperatur och värmningstid.

Idag genomförs kvalitetskontroller på den brända kalken i efterhand sex gånger per dygn, vilket motsvarar ett test var fjärde timme. Nackdelen med denna återkopplingsmetod är att bränd kalk med sämre kvalitet redan är producerad vid testtillfället samt att det är svårt att kalibrera ugnsp parametrar (temperatur och tillverkningsstid) mot ingående och utgående kvalitet. Att ha genomgående högre temperatur och längre värmningstider, för att ligga på säkra sidan, påverkar energiförbrukning, utsläpp av koldioxid och produktiviteten på ett negativt sätt. Det hade varit en fördel att kunna mäta kalcineringsgraden direkt under värmningen för att därigenom direkt kompensera vid lägre kalcineringsgrad (mindre med CaO) med högre temperatur eller längre värmningstider så att utgående kvalitet blir jämn och hög.

2. Schaktugnar

Schaktugnar är 15–20 meter höga. En vanlig typ av ugn är dubbelschaktugnen, vilken kallas PFR-ugn (Parallel Flow Regenerative). Maerz är en av de större leverantörerna av dessa ugnar. ABB tillverkar och säljer ugnstyrningssystem till schaktugnar.

Schakten interagerar i par (se figur 1). Kalkstenen fylls på ovanifrån och den brända kalken tas ut i botten. Kalken inne i ugnen består av 45–90 mm stora kalkstenar. Även finare partiklar kan förekomma. Det innebär att det finns hålrum fyllda med förbränningsgas och kalkstoft. Kalcineringen sker i huvudsak i mittdelen av ugnen där temperaturen är ca $+940^\circ\text{C}$. Temperaturen i stenmaterialet kan inte mätas direkt, men det finns givare för temperaturmätning i ugnsinfodringen. Vid temperaturmätningens positionen är Nordkalks ugn på Gotland ungefär fyra meter i diameter.



Figur 1. Schaktugn på Nordkalks anläggning på Gotland.

3. Metod och material

Syftet med detta projekt var att testa och utveckla en radiobaserad metod (elektromagnetisk strålning) för bestämning av kalcineringsgrad och temperatur av den brända kalken. En tes var att ökad temperatur skulle ge högre dielektricitetskonstant och lägre signalamplitud. Vid högre temperaturer och ökad energitillförsel minskar de så kallade bandgapen i molekylerna, vilket leder till att de fria valenselektronerna kan röra sig lättare. Kalkstenen blir således mer ledande med ökande temperaturer, vilket absorberar (lägre amplitud) den elektromagnetiska strålningen. Molekylerna rör sig dessutom mer med ökande temperaturer, vilket fördröjer (lägre hastighet) den elektromagnetiska strålningen. En annan tes var att den brända kalken/kalciumoxiden och dess lägre densitet skulle ge ökad hastigheten för den utsända elektromagnetiska strålningen. Vid omvandling från kalciumkarbonat (CaCO_3) till kalciumoxid (CaO) förändras molvikten från 100,0869 till 56,0774. Det motsvarar en viktninskning på 44 procent.

3.1 Mätmetod

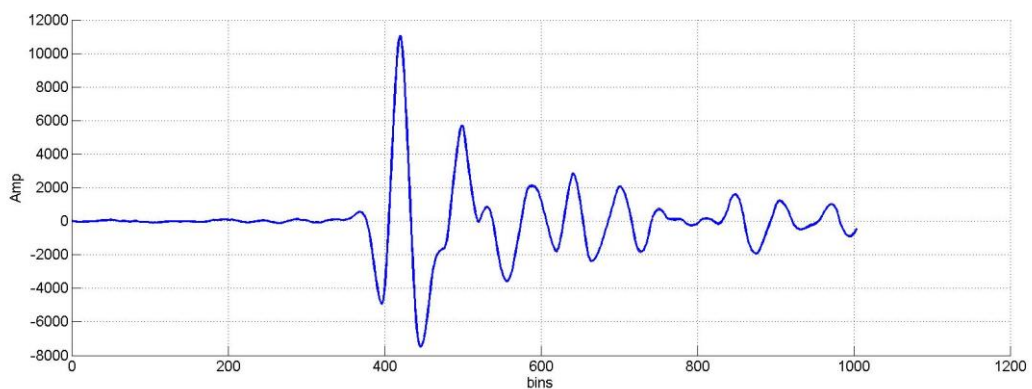
Mätmetoden bygger på att mäta och beräkna dielektricitetskonstanten (kvadraten på brytningsindex) och dämpningen av signalamplitud med en radiomätutrustning. Sändare och mottagare placeras på var sida om kalkprovet/ugnen, se figur 2. Radiomätutrustningen är utvecklad Radarbolaget. Utrustningen är ett UWB-baserat radiomätsystem (Ultra Wideband) som sänder inom ett brett frekvensspektrum. Fördelen med ett UWB-baserat radiomätsystem jämfört med ett smalbandigt radiomätsystem är att:

- Längder mäts och erhålls i realtid utan skiftning mellan olika frekvenser
- UWB-signalen är mindre känslig för dämpning av enskilda frekvenser
- Relativt immun mot interferens och störning från andra radiokällor.



Figur 2. a) Bränd kalk. b) Radiomätssystem för mätning av kalcineringsgrad i bränd kalk på provlåda.

Bredbandigheten i ett UWB-system kan skapas genom frekvenssvepning med FMCW (frequency modulated continuous wave), generering av bredbandig puls eller genom att skicka ut en PRBS-kod (pseudo random binary sequence). Radarbolagets radiomätutrustning baseras på utsändning och korrelation av PRBS-kod. Resultatet blir en bredbandig radiosignal, se figur 3.



Figur 3. Bredbandig radiosignal efter mätning genom bränd kalk.

3.2 Digital radiomätutrustning

Den digitala radiomätutrustningen, som användes i projektet, genererar pulser genom utsändning av en unik pseudokod (PRBS-kod) som senare korreleras och signalbehandlas i en FPGA (Field Programmable Gate Array). Den effektiva samplingsfrekvensen är 80 GHz vilket ger en mätupplösning på 3,75 mm. Antennerna sänder med låg effekt och är vanligtvis operativa <70 meter beroende på mellanvarande medium.

UWB-baserat radiomätssystem mäter time-of-flight, den tid som elektromagnetiska vågor transporteras i olika media såsom luft, keramik och icke elektriska material. Detta kan liknas vid att mäta den tid det tar för ljuset att röra sig mellan två punkter. Elektromagnetiska vågor kan inte transporteras genom elektriskt ledande material såsom metaller. För icke ledande material gäller att högre dielektricitetskonstant ger lägre hastighet.

3.3 Sensor i projektet

Den sensor som använts inom projektet består av två antenner (mottagare och sändare) med antennhus. Antennerna är så kallade Vivaldi-antennerna och används för att sända ut och ta emot bredbandiga signaler. Centerfrekvensen för frekvensområdet är 2 GHz. Sensorerna är via ett fibernät kopplade till en beräkningsenhet (Radar Processing Unit, RPU). Inom ramen för ett annat projekt har en digital radarsensor (DiRP, Digital Radar Processor) utvecklats. Med denna nya enhet kan högre signal-till-brus-förhållande, högre förstärkning och eliminering av läcksignaler erhållas. Denna enhet är tänkt att användas i en eventuell förlängning av detta projekt.

4. Laboratorieförsök

4.1 Installation

Sambandet mellan temperatur, kalcinering och dielektriska egenskaper (dielektricitetskonstant och dämpning) undersöktes under kontrollerade förhållanden. En särskild behållare och laboratorieugn användes. Behållaren bestod av elfast material och rymde ca 35 liter, se figur 4. Laboratorieugnen var en vanlig keramikugn där det hade gjorts möjligt att montera två radiosensorer, se figur 5.



Figur 4. Behållare med kalksten och temperaturelement nedstucket i kalkstenen.



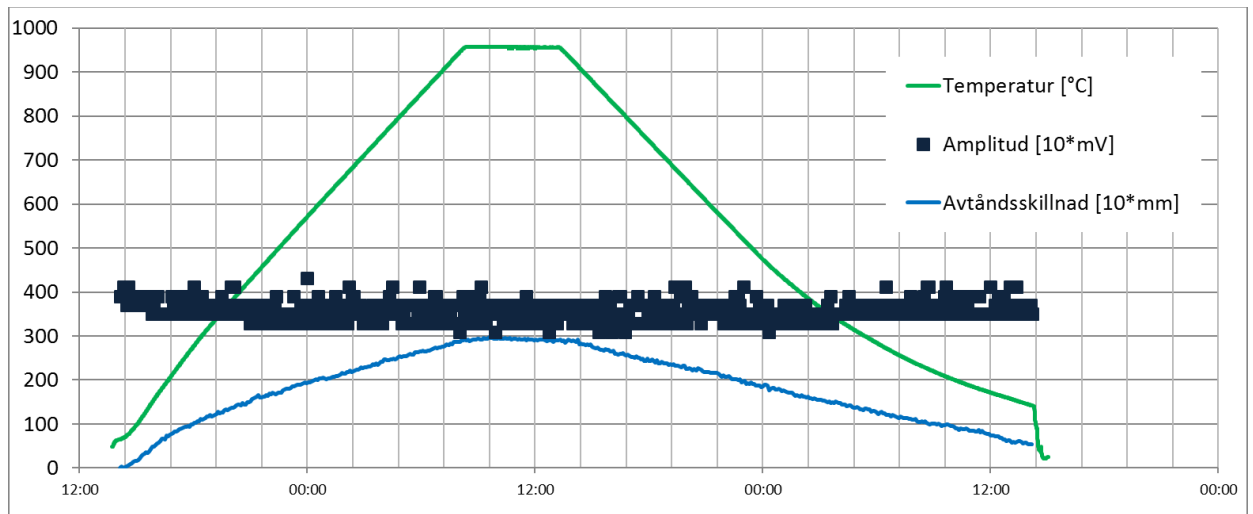
Figur 5. Specialbyggd keramikugn med radiomätutrustning.

Laborarieugnen kunde värmas upp till +1 300°C, men normaltemperaturen under försöken var +900–950°C. Vid försöken användes våg (noggrannhet på 50 gram), temperatursensor (luft och material), kraftsensor (elförbrukning) och koldioxidtillförsel. Tanken med kraftsensorn var att registrera energitillförseln, men eftersom energitillförsel var pulsad så var det svårt att analysera och gav inget extra mervärde. Koldioxidtillförsel syftade till att efterlikna ugnsatmosfären i schaktugnar. Det var svårt att förse laborarieugnen med koldioxid på ett kontrollerat sätt. Därför redovisas inga resultat med koppling till om ugnsatmosfären var koldioxidmättad eller ej.

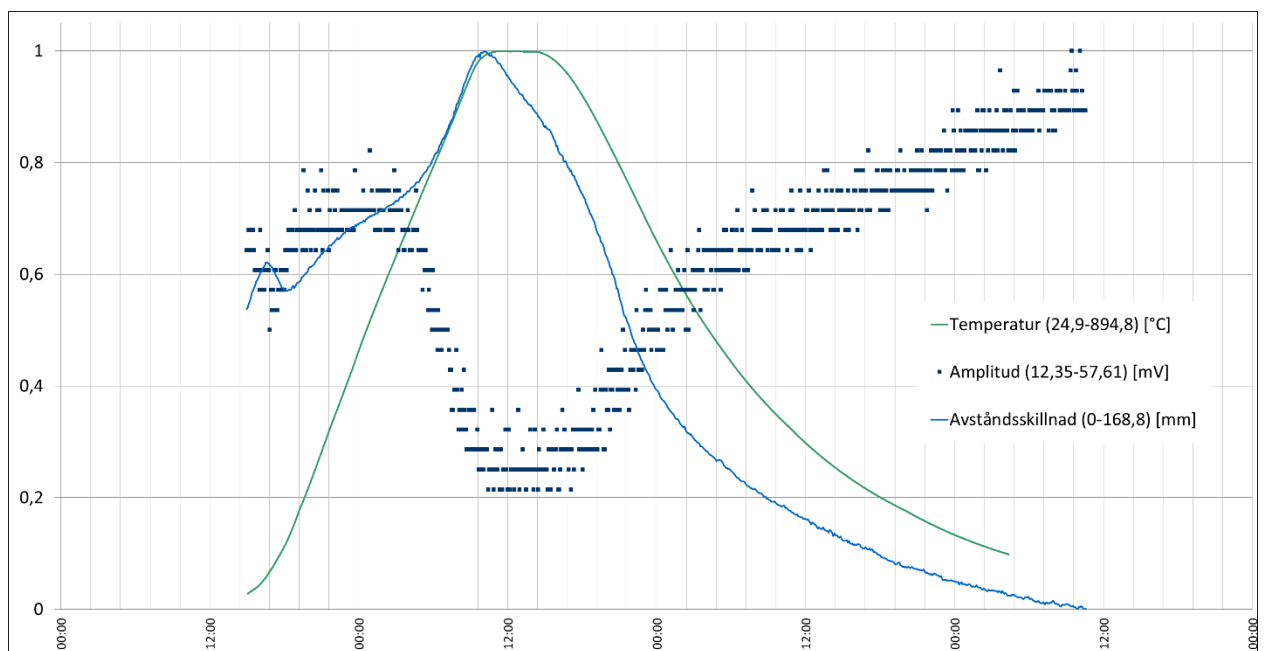
4.2 Resultat

Vid alla försök krävdes successiv temperaturstegring av laborarieugnen med +50°C per timme. Därför tog det ungefär ett dygn innan den låg på en operativ temperatur på +950°C. Operativ temperatur bibehölls 12–24 timmar för att uteslutande kunna granska kalcineringsens påverkan på dielektricitetskonstant och dämpning. Det genomfördes ungefär tio försök. Därav genomfördes förberedande försök med syfte att ta fram mätmetod samt för att göra referensmätningar på tom ugn och ugn med tom behållare. Fyra försök redovisas nedan. Värdena är normaliserade, försök 2–4, för att alla värden skulle kunna visas i samma graf:

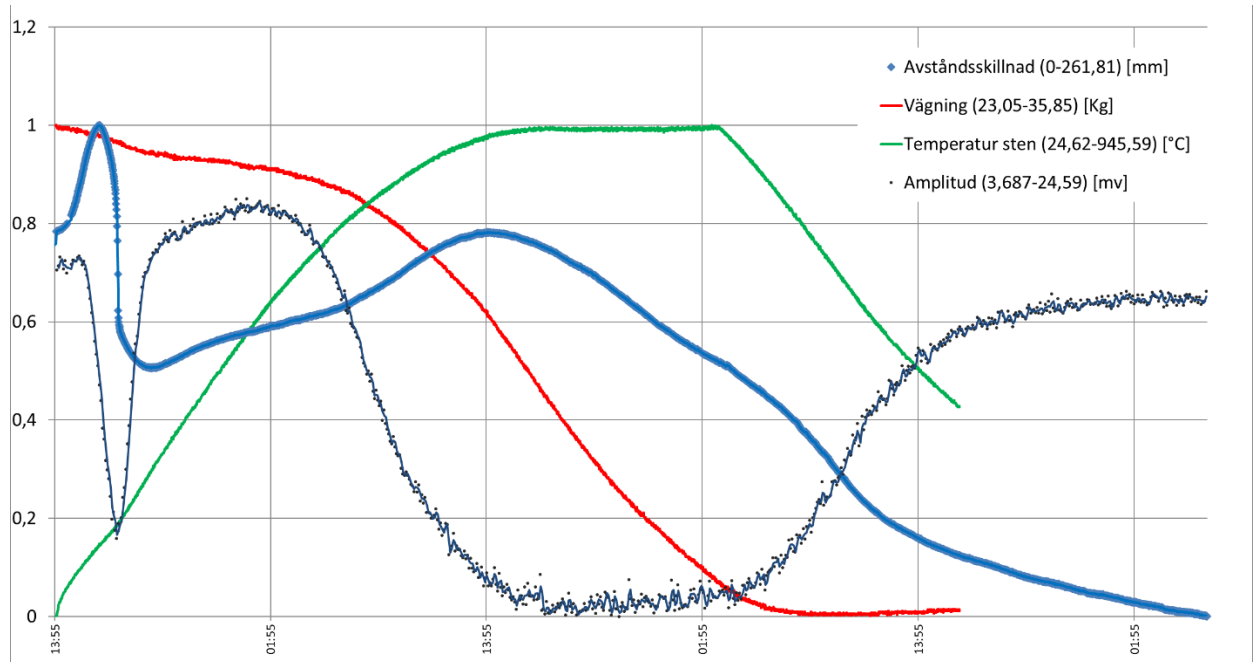
1. Referensmätning på laborarieugn med tom behållare (se figur 5). Dielektricitetskonstant, temperatur och amplitud mättes.
2. Mätning utan våg och utan tillförsel av koldioxid (se figur 6). Dielektricitetskonstant, temperatur, vikt och amplitud mättes.
3. Mätning med våg och utan tillförsel av koldioxid (se figur 7). Dielektricitetskonstant, temperatur, vikt och amplitud mättes.
4. Mätning med våg och med tillförsel av koldioxid (se figur 8). Dielektricitetskonstant, temperatur och vikt mättes.



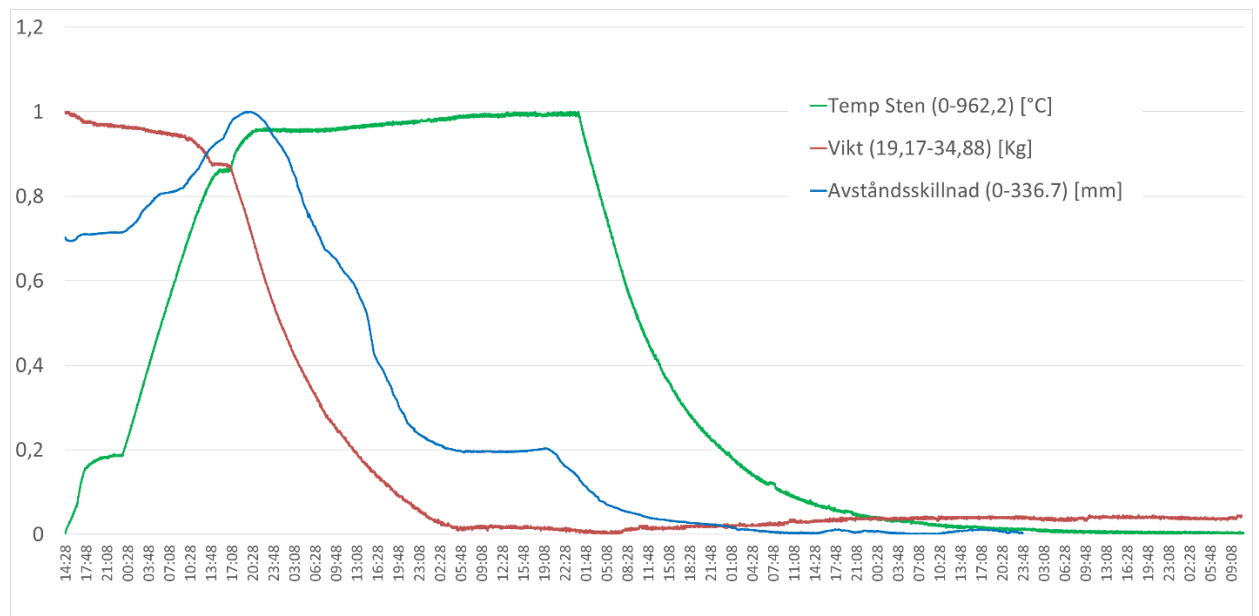
Figur 5. Referensmätning 1 på tom låda (2016-02-10 14:08 – 2016-02-12 14:10).



Figur 6. Mätning 2 utan våg utan koldioxidmättad atmosfär (2016-02-12 14:58 – 2016-02-15 10:33). Värdena är normaliserade.



Figur 7. Mätning 3 med väg utan koldioxidmättad atmosfär (2016-04-22 14:00 – 2016-04-24 16:13). Värdena är normaliserade.



Figur 8. Mätning 4 med väg med koldioxidmättad atmosfär, del av mätning (2016-06-02 14:28 – 2016-06-10 10:53). Värdena är normaliserade.

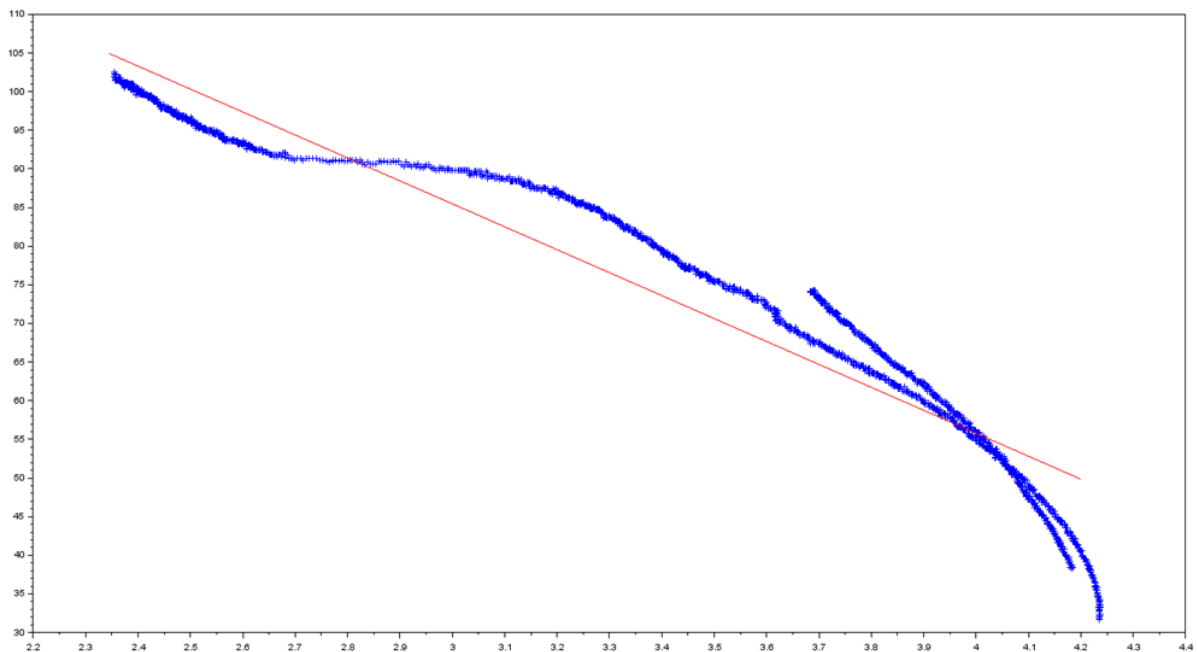
I figur 8 går det att se hur kalcineringen relativt hastigt avtar efter att laboratorieugnen har legat på +940°C i ungefär 32 timmar. Kalcinering (vikt) och dielektricitetskonstanten (avståndsskillnaden) har i det närmaste ett linjärt samband dessförinnan. Det går också att se hur temperaturen ökar när kalcineringen avtar. Den

kemiska processen har då avtagit och håller inte längre emot temperaturhöjningen. När laboratorieugnen stängs av minskar dielektricitetskonstanten ytterligare, men då i relation till temperaturen.

De första hastiga rörelserna i figur 6–7 beror på att kalkstenen var fuktig. Vatten påverkar de dielektriska egenskaper mycket i och med att vattenmolekylen är polär och rör sig i takt med den elektromagnetiska strålningens svängningar (frekvens). Under försöket i figur 8 hade kalkstensprovet torkats först. Dämpningen (amplituden) mättes endast under försök 2–3 (figur 6–7) och det går att se att denna storhet framför allt är kopplad till temperaturen. Den viktigaste dielektriska egenskapen är dielektricitetskonstanten. Den är lätt att mäta även om signalen är låg, men dämpningen kan också komma att användas.

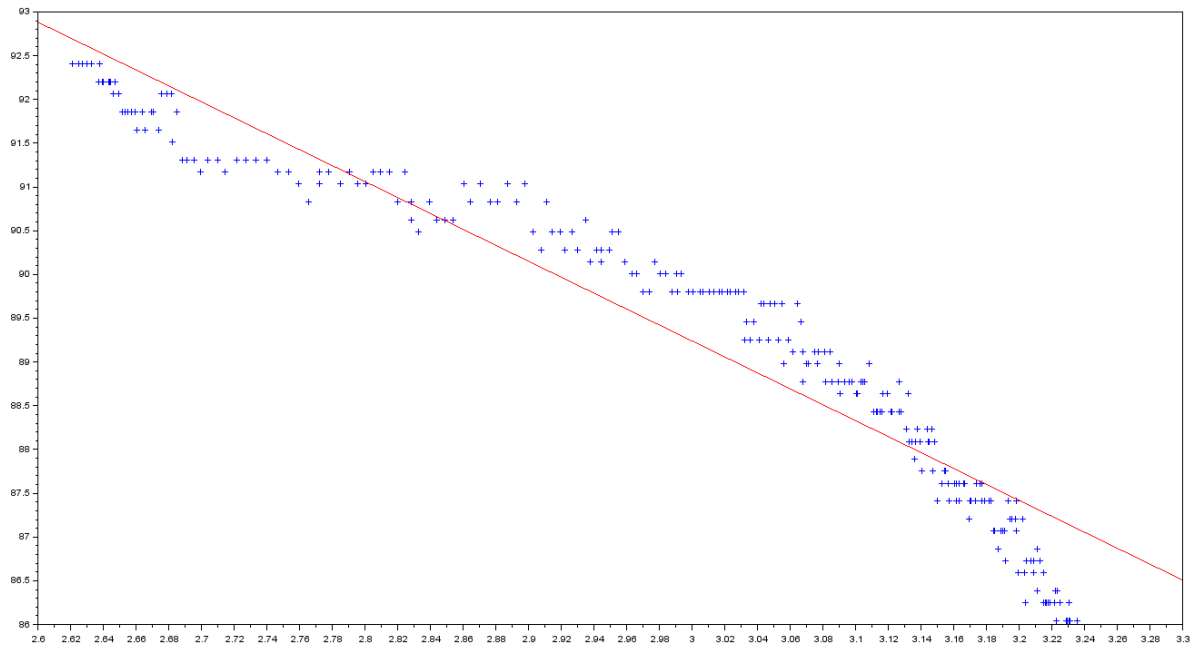
4.3 Samband laboratorieugn

I figur 7–8 finns två perioder då temperaturen ligger konstant på +940°C. Värdet från radarmätning (dielektricitetskonstant) och viktmätning (omräknat till procentuell kalcinering) har tagits fram för dessa mätperioder för att beräkna sambandet mellan storheterna. Det gjordes en kemisk analys för att verifiera att viktmätningen kunde användas för beräkning av kalcineringsgraden, men det är viktigt att notera att ingen kontinuerlig kemisk analys gjordes. En minstakvadratanpassning (MK-anpassning) har gjorts för de perioder då temperaturen var ca +940°C, se figur 9a och ekvation 1a. Värdena beskriver större delen av kalcineringsprocessen (30–100% kalcinering). Vid en mätningsposition på en schaktugn kommer endast en mindre del av kurvan att representeras (t.ex. 86–92,5%, se figur 16). Om en anpassning görs till kalcineringsintervallet 86–92,5% erhålls sambandet enligt figur 9b och ekvation 1b. Standardavvikelsen är $\sigma=5,502$ procentenheter (pe) för hela kalcineringsintervallet (figur 9a) och $\sigma=0,529$ pe för intervallet 86–92,5% (figur 9b).



Figur 9a. Kort mätning (enligt figur 7) och lång mätning (enligt figur 8) i blått har använts för att ta fram sambandet utritat i rött, se ekvation 1. Y-axel (dielektricitetskonstant) och x-axel (procent kalcinering). $\sigma=5,502$ pe

$$CaO = 174,56 - 29,69dk \quad (1a)$$



Figur 9b. Mätdata 86–92,5% kalcinering (enligt figurer 7–8) i blått har använts för att ta fram sambandet uttrykt i rött, se ekvation 1b. Y-axel (dielektricitetskonstant) och x-axel (procent kalcinering). $\sigma=0,529$ pe

$$CaO = 116,56 - 9,11dk \quad (1b)$$

5. Fullskaleförsök

Radarbolaget har genomfört mätning på Nordkalks schaktugn i Storugns, Gotland. Försöket var planerat att genomföras under två veckor, men det genomfördes under fyra månader. Syftet med förlängningen var att erhålla mer och noggrannare ugnsdata under verkliga driftförhållanden. Vid försöket har mätning gjorts:

- Då schaktugnen var tom (kall och varm)
- Då schaktugnen fylldes successivt med allt grövre material under uppstarten
- Då schaktugnen har varit drift.

5.1 Installation

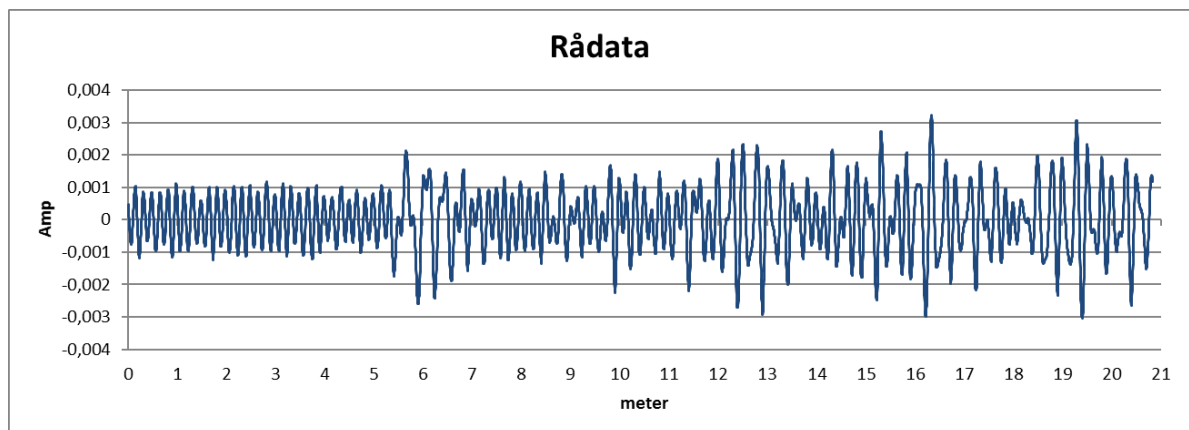
Radarbolaget och Nordkalk installerade trycktätad sensor på respektive sida av schaktugnen, i den zon där kalcineringen pågick och där temperaturen var ca +940°C. Internetuppkoppling möjliggjorde övervakning och datafångst på distans.



Figur 9. Installation av radiomätutrustning på Nordkalks schaktugn i Storugns, Gotland.

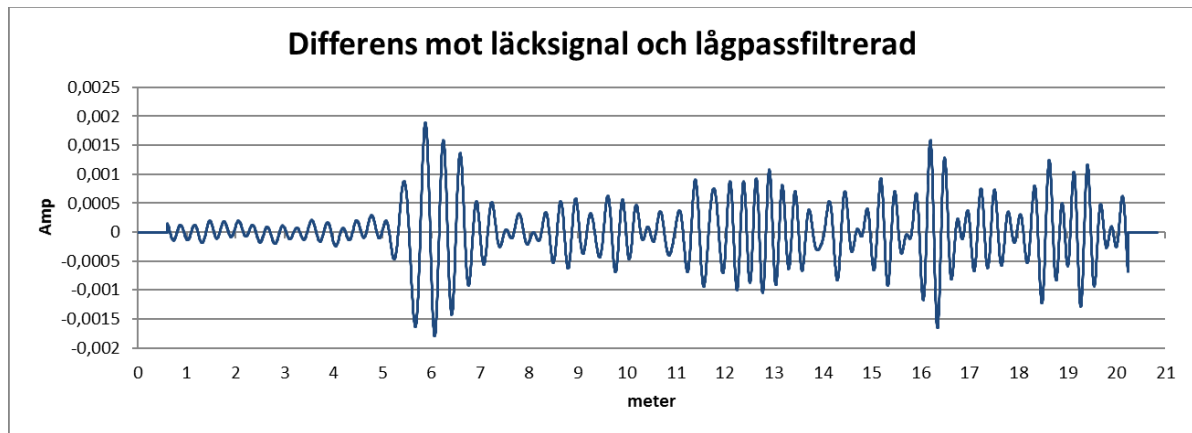
5.2 Radiovåg och signalbehandling

Vid länkmätning med radio erhålls en direktsignal, vilken brukar vara fullt tillräcklig för att bestämma mätt avstånd. Avståndet ger den så kallade dielektricitetskonstanten. I detta fall hade signalen ett relativt lågt signal-till-brusförhållande på grund av att mätningarna gjordes genom ett varmt stenmaterial (se figur 10).



Figur 10. Ursprungliga råsignal med länksignal och utan signalbehandling.

Vid ett lågt signal-till-brusförhållande är det viktigt att eliminera signalbrus. I detta fall användes en radiomätutrustning som genererade en svag läcksignal. En läcksignal beror på att signalgeneratoren läcker PRBS-koden till ingående kanal samt att generatoren inte är separerad från mottagande sensor. Läcksignalen kunde registreras genom att sändaren slogs av. I detta fall var det också naturligt att applicera ett lågpasfilter på signalen eftersom de höga frekvenserna var att betrakta som brus (se figur 11). Resultatet är en signal med ett fullt tillräckligt signal-till-brusförhållande. Det registrerade avståndet mellan sändare och mottagare på schaktugnen, i detta fall, var ca 6 meter. Schaktugnens fysiska mått är ca 4 meter. Det sker sålunda en fördröjning på drygt två meter.

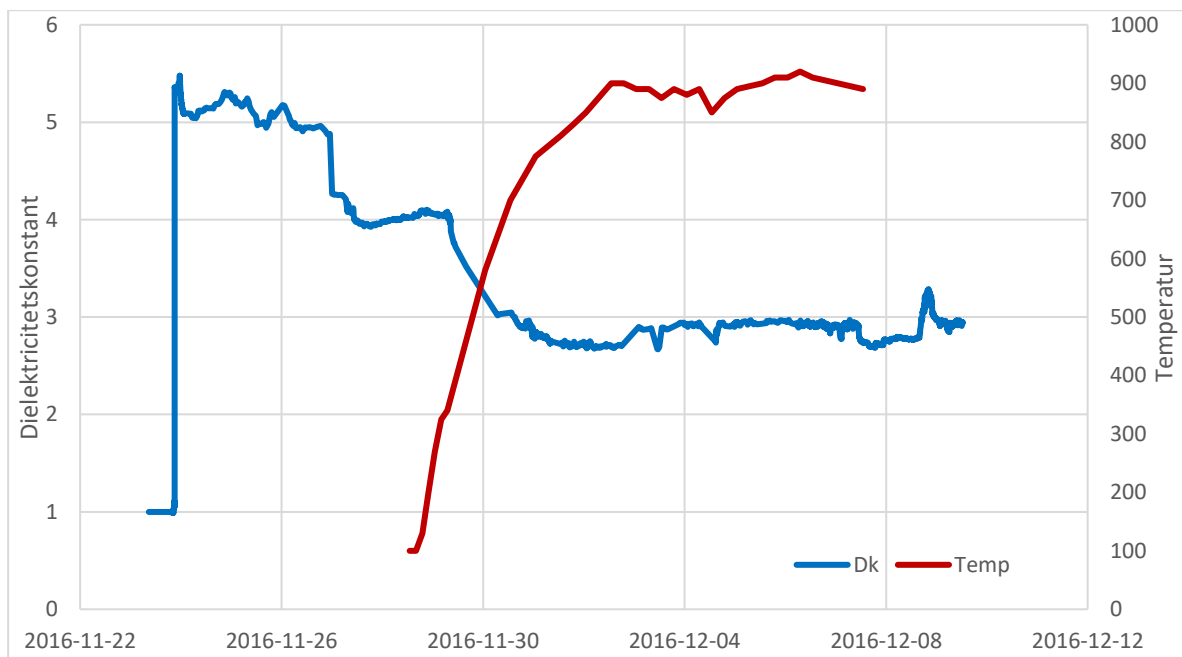


Figur 11. Signal efter subtraktion av läcksignal och med lågpasfilterering av signal.

5.3 Resultat

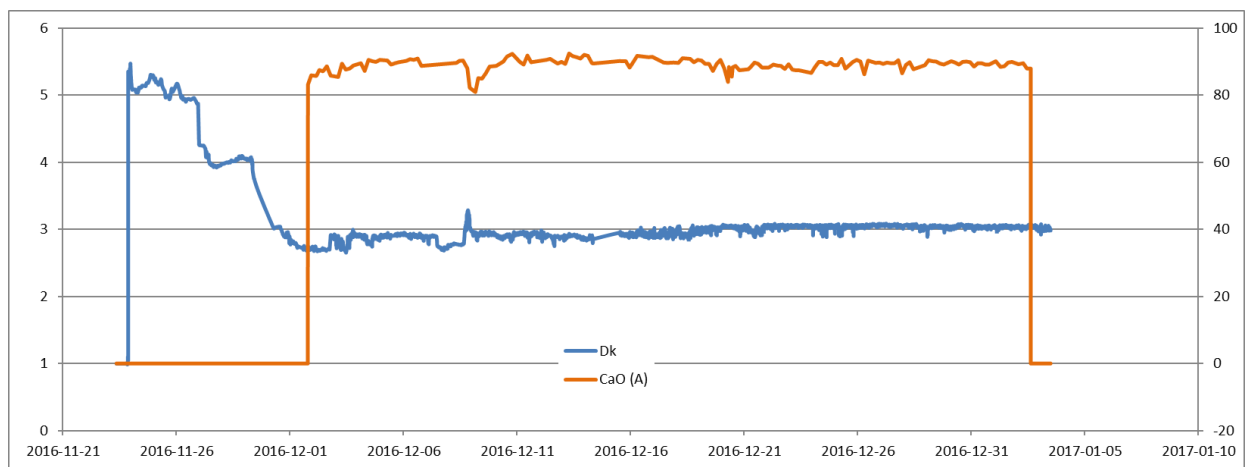
Radiomätutrustningen mäter ett avstånd, varifrån den så kallade dielektricitetskonstanten kan beräknas. Konstanten motsvarar kvadraten av radiovågens relativa utbredningshastighet i mediet mellan antennerna (se figur 11). Luft har dielektricitetskonstanten $dk=1$ (i detta fall en tom schaktugn). Resultat från ilastning och uppstart av schaktugn visar att (se figur 12):

- Dielektricitetskonstanten är $dk=5$ för fin fraktion och kall kalksten
- Dielektricitetskonstanten är $dk=4$ för grov fraktion och kall kalksten
- Dielektricitetskonstanten går successivt mot $dk=3$ för grov fraktion och då värmningsprocessen startar. Vattenmängden minskar sålunda i råmaterialet.

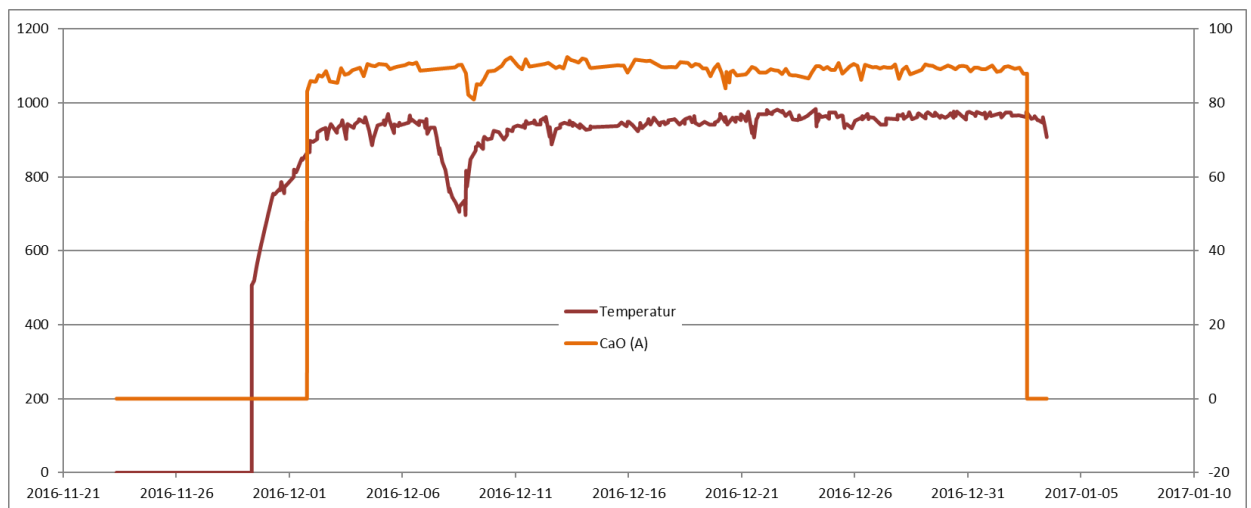


Figur 12. Dielektricitetskonstant (blå) och temperatur (röd) vid start av schaktugnen i november och december.

Redovisad mätning med radiomätutrustning på schaktugnen i Storugns genomfördes under fem veckor. Under mätperioden gjordes provtagning och referensmätning av aktivt CaO var fjärde timme, vilket motsvarar sex prover per dygn. Dessa referensmätningar görs på mindre sampel, som tas ut och analyseras kemiskt. Det finns sålunda en samplingsproblematik i referensmätning och en osäkerhet i den kemiska analysen ($3\sigma=0,5$ pe enligt Nordkalk). Det finns en tidsförskjutning på ca 12 timmar mellan referensmätning och radiomätning, men den varierar med uttagningshastigheten. Dielektricitetskonstanten ska vara inverterat proportionell mot andelen aktivt CaO, se figur 13. I dagsläget används temperaturen (väggmätning i schaktugnen) för styrning av kalcineringsgraden. Temperaturen ska vara proportionell mot andelen aktivt CaO, se figur 14.

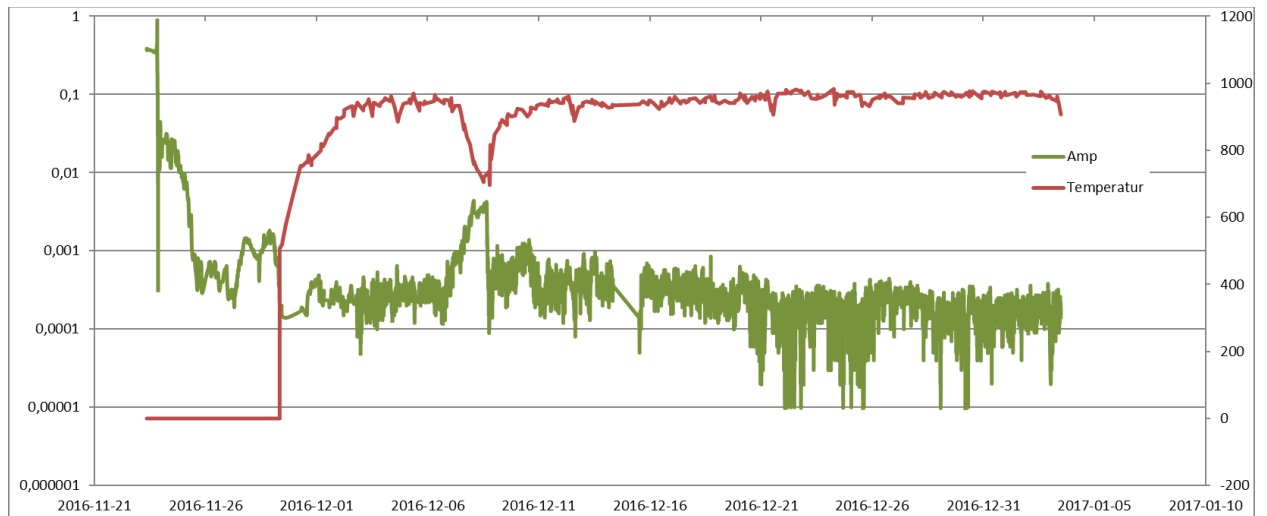


Figur 13. Dielektricitetskonstant (blå) och aktivt CaO (orange) under drift december-januari.

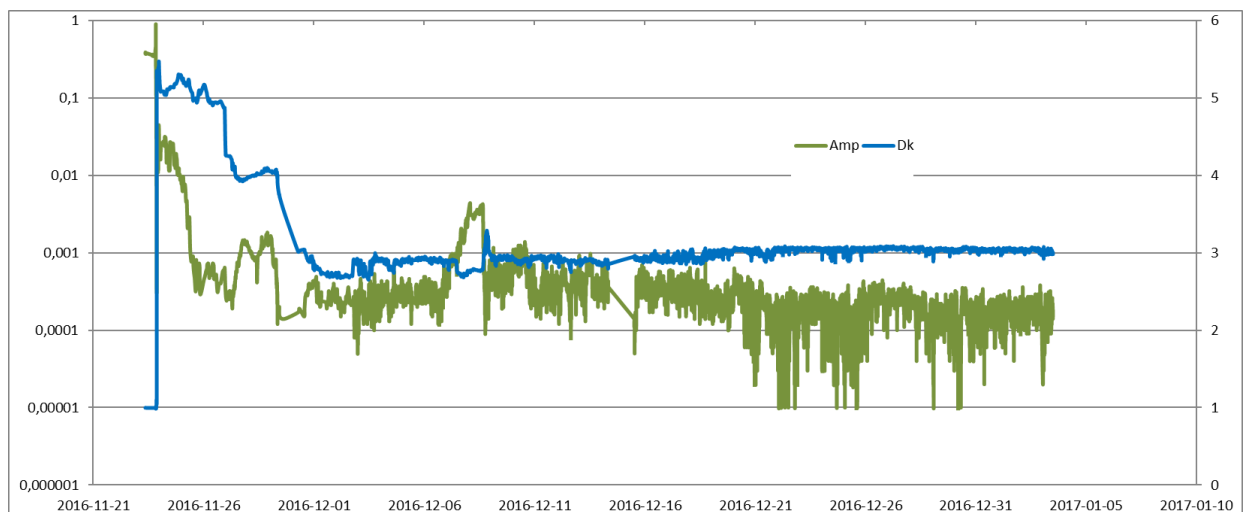


Figur 14. Temperatur (röd) och aktivt CaO (orange) under drift december-januari.

Alla material och media dämpar radiosignalen, vilket kan ses som minskad signalamplitud. Ju tätare material desto högre dämpning och lägre amplitud. Dämpningen beror på att materialet absorberar den elektromagnetiska strålningen. Vid höga temperaturer minskar bandgapen i keramiska material och de fria valenselektronerna får därigenom större möjlighet att röra sig, vilket leder till att materialet blir halvledande. Detta ökar absorptionen kraftigt, se figur 15-16.



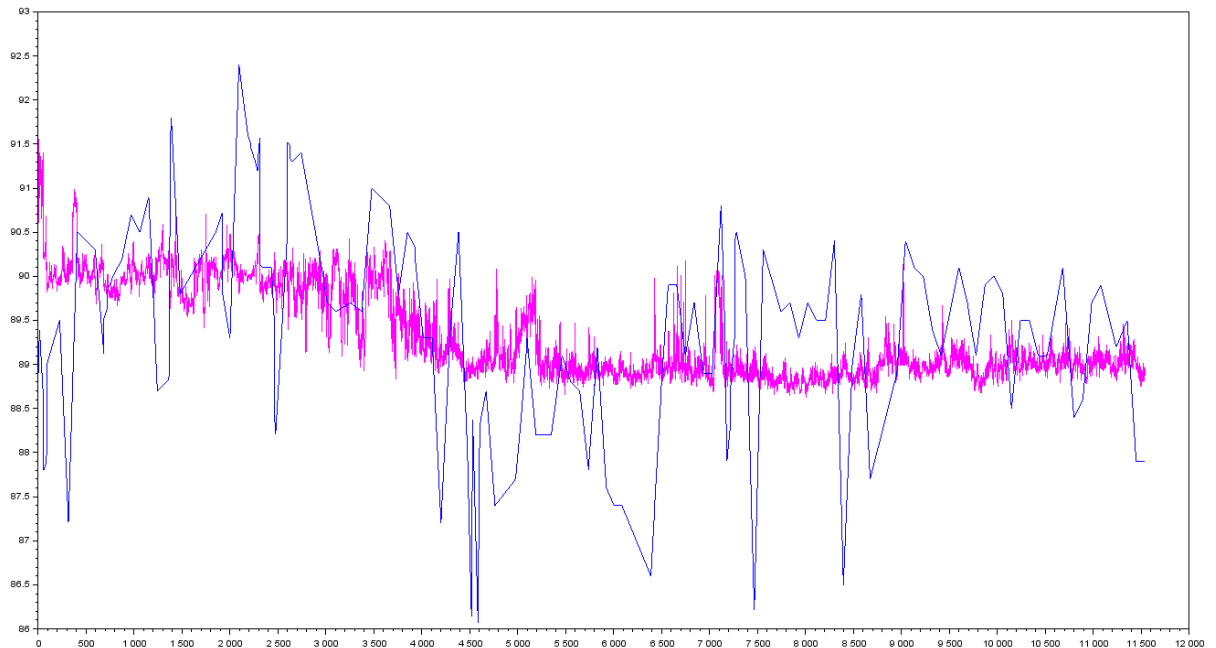
Figur 15. Amplitud (grön) logaritmisk skala och temperatur (röd) under drift december-januari.



Figur 16. Amplitud (grön) logaritmisk skala och dielektricitetskonstant (blå) under drift december-januari.

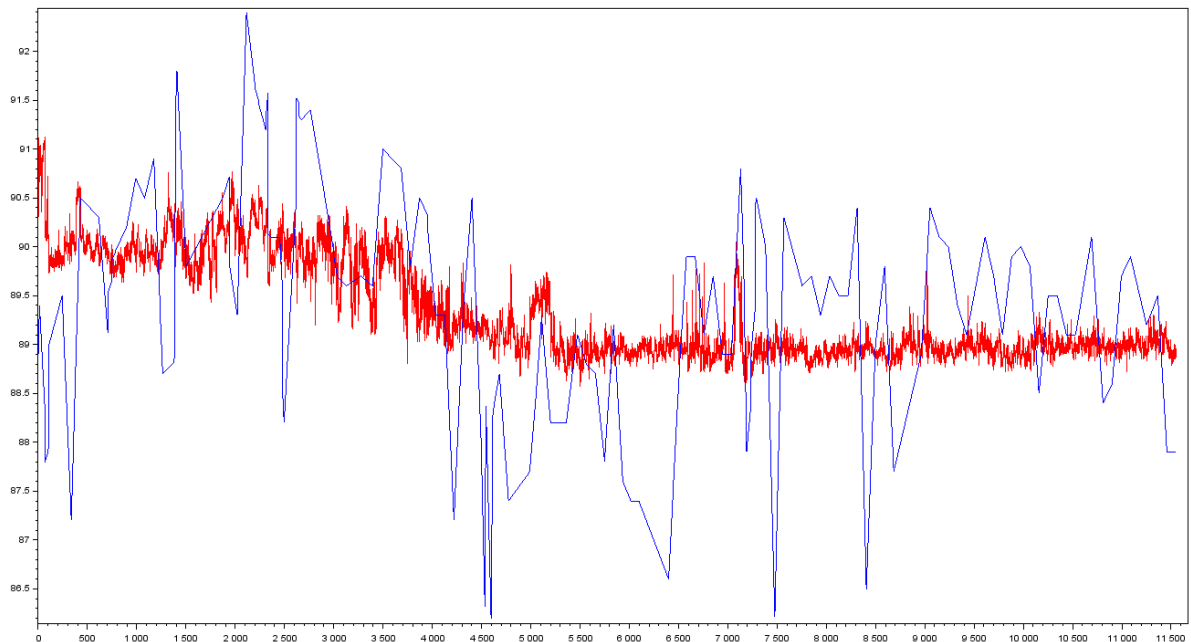
5.4 Samband schaktugn

Dielektricitetskonstanten och amplituden påverkas av både temperatur och kalcineringsgrad. I figur 7 går det att se att vatten och fukt i stenmaterialet påverkar mätningarna kraftigt vid lägre temperaturer. I normal produktion, i schaktugnar, så existerar denna situation endast vid inmatningen av råmaterialet. Därför ska samband endast beräknas när kalcineringen är det dominerande förloppet, och där temperatur och andra faktorer påverkar så lite som möjligt eller är konstanta. Utgångspunkten är att sambandet är linjärt mellan de dielektriska storheterna och kalcineringsgraden. Genom en minsta kvadrat-anpassning (MK-anpassning) går det att anpassa dielektricitetskonstant och amplitud till kalcineringsgrad för data över +940°C. Standardavvikelsen är $\sigma=0,955$ procentenheter (pe) vid anpassning till dielektricitetskonstant samt $\sigma=0,955$ pe vid anpassning till dielektricitetskonstant och amplitud (se figur 17a-b och ekvationer 2–3). Ekvation 1b och 2 är relativt lika, vilket är positivt och visar att anpassning för laboratorieugn och schaktugn är relativt ekvivalenta.



Figur 17a. Mätt kalcineringsgrad (blå). Beräknad kalcineringsgrad (lila) från dielektricitetskonstant med eliminering av grova fel ($\sigma=0,955$ pe) för data $\geq 940^{\circ}\text{C}$, ekvation 2.

$$CaO = 103,71 - 12,20dk \quad (2)$$



Figur 17b. Mätt kalcineringsgrad (blå). Beräknad kalcineringsgrad (röd) från dielektricitetskonstant och amplitud med eliminering av grova fel ($\sigma=0,953$ pe) för data $\geq 940^{\circ}\text{C}$, ekvation 3.

$$CaO = 101,17 - 10,26dk + 1057,509 \alpha \quad (3)$$

där CaO är procentuell kalcineringsgrad, dk är dielektricitetskonstant, t är temperaturen och α är amplituden.

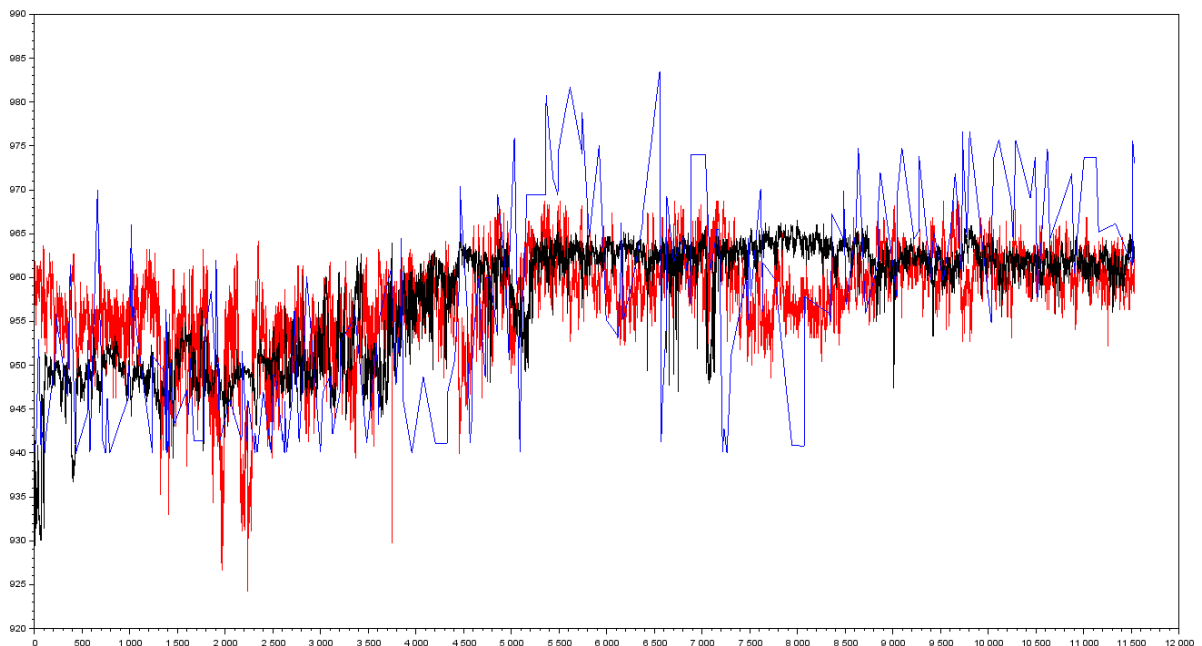
I dagsläget kan data från temperaturgivare i väggen på nivån för kalcineringszonen användas för att reglera kalcineringen av råmaterialet (kalkstenen). Problemet med dessa temperaturgivare är att de inte mäter direkt på materialet och att det dessutom finns en fördröjning och utjämnings effekt i erhållet temperaturvärde. Väggen tar längre tid att hetta upp eller att kyla ner i förhållande till råmaterialet. Genom en MK-anpassning går det att anpassa temperatur till kalcineringsgrad för data över +940°C. Standardavvikelsen är $\sigma=1,003$ pe (se figur 18 och ekvation 4).



Figur 18. Mätt temperatur (blå). Beräknad kalcineringsgrad (lila) från temperatur med eliminering av grova fel ($\sigma=1,003$ pe) för data $\geq +940^{\circ}\text{C}$, ekvation 4.

$$CaO = 122,81 - 0,035t \quad (4)$$

Vid en första anblick verkar amplituden (dämpningen och absorptionen) vara kopplad till temperaturen. Den faller kraftigt vid ökad temperatur. I och med att temperaturmätning i väggen har vissa utmaningar med fördröjning och att man inte mäter direkt på materialet så vore det intressant att veta om amplituden kunde användas för att uppskatta temperaturen. Genom en MK-anpassning går det att anpassa amplitud och dielektricitetskonstant till temperatur för data över +940°C. Standardavvikelsen är $\sigma=9,63^{\circ}\text{C}$ respektive $\sigma=8,89^{\circ}\text{C}$ (se figur 19 och ekvation 5–6). Det ska dock noteras att denna anpassning är gjord till väggtemperaturen. För bättre anpassning och kalibrering kan det krävas en annan referensmätmetod av temperaturen.



Figur 19. Mätt temperatur (blå). Beräknad temperatur (röd) från amplitud ($\sigma=9,63^{\circ}\text{C}$), ekvation 5. Beräknad temperatur (svart) från dielektricitetskonstant ($\sigma=8,89^{\circ}\text{C}$) för data $\geq+940^{\circ}\text{C}$, ekvation 6.

$$t = 968,71 - 45805,17 \alpha \quad (5)$$

$$t = 775,36 + 154,68dk \quad (6)$$

6. Slutsatser och framtid

6.1 Mätningar

Vid mätningar i laboratorieugn (Köping) och i Nordkalks schaktugn i Storugns (Gotland) har radio- och referensmätningarna fungerat bra. Vid högre temperaturer minskar de så kallade bandgapen i molekylerna, vilket ökar kalkens och isoleringens ledningsförmåga. Detta leder i sin tur till att den elektromagnetiska strålningen absorberas och dämpas, vilket då leder till lägre amplitud. Amplituden är dock inte så låg att mätningarna inte gick att genomföra. Vid mätning i riktig schaktugn skulle högre amplitudnivåer vara fördelaktiga. Det kan åtgärdas genom att använda Radarbolagets nya radiomätutrustning (DiRP, Digital Radar Processor) där sändare (Tx) och mottagare (Rx) är helt åtskilda. Därigenom kan läcksignalen i befintlig radiomätutrustning elimineras. Läcksignalen påverkade mätningarna mest negativt. Det finns också möjlighet att sänka nuvarande frekvens från 2 GHz till 1–1,5 GHz, vilket borde påverka mätningarna gynnsamt.

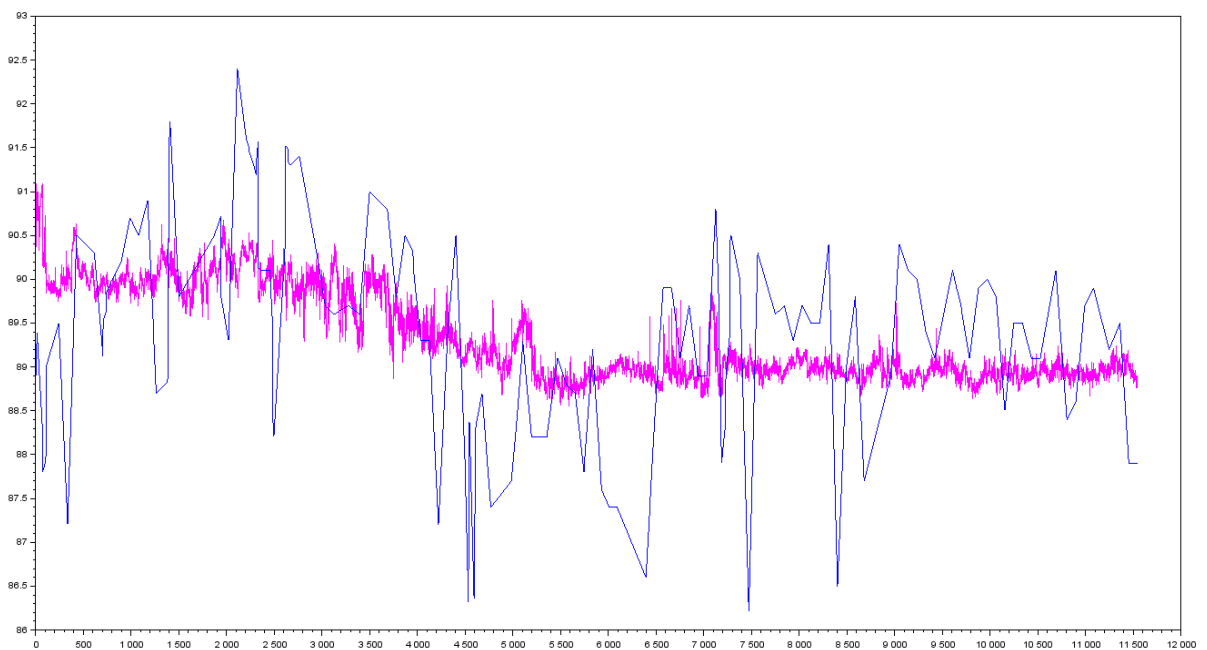
Under laboratorieförsöken mättes *ugnsisoleringen* i hög temperatur med gott resultat, men troligtvis påverkar den innersta isoleringen mätningarna mest (se grå sten i figur 20). Det är dock osäkert om isoleringen påverkar mätningarna på marginalen eller inte. Den varma kalciumoxiden (CaO) torde vara varmare än isoleringen, men samtidigt är den mer porös. Eventuellt bör man således överväga viss omkonstruktion eller ersättning av material framför radiomätutrustningen. Fler försök krävs, t.ex. på varm schaktugn utan kalksten.



Figur 20. Fyra lagars isolering upphettades och mättes. Blågrå=lättast material, rött=lättare material, vit=tyngre material, grå=tyngst material.

6.2 Samband

Dielektricitetskonstanten minskar med ökad kalcinering (aktivt CaO) vid konstant temperatur. Vid ökad temperatur minskar amplituden och dielektricitetskonstant ökar. Förändringen i de dielektriska egenskaperna påverkas sålunda av kalcinering (aktivt CaO) och temperatur om man antar att densitet, ingående material och fraktionsstorlek är lika. Därför är det viktigt att genomföra kalcineringsmätningarna med radiomätutrustningen vid konstant temperatur eller att om möjligt korrigera för temperaturen. Nackdelen med temperaturmätningarna är att de har en viss eftersläpning på grund av att mätningarna görs i väggen och inte i stenmaterialet. Om man till skillnad från figur 17–19 gör en MK-anpassning av kalcineringsgrad även för temperatur (inklusive dielektricitetskonstant och amplitud) erhålls figur 21 och ekvation 7. Resultatet är bara nämnvärt bättre än vid anpassning till dielektricitetskonstant och amplitud.



Figur 21. Beräknad kalcineringsgrad från dielektricitetskonstant, amplitud och temperatur med eliminering av grova fel ($\sigma=0,948$ pe) för data $\geq +940^{\circ}\text{C}$, ekvation 7.

$$CaO = 108,67 - 9,17dk + 823,79 \alpha - 0,0091t \quad (6)$$

Det finns en tidsförskjutning mellan prov av aktivt CaO (kalcineringsgrad) och radiomätningen på ungefär 12 timmar, varför kalcineringsmätningarna är justerade bakåt med 12 timmar. Denna förskjutning kan variera några timmar eftersom den beror på en varierande uttagshastighet. Under en eventuell kommande inkörningsperiod bör denna tid synkroniseras så bra som möjligt. Variationer i tidsförskjutningar elimineras till stor del genom ett stort statistiskt urval.

Radiomätsystemet är framför allt tänkt att mäta kalcineringen där kalcineringen sker. Systemet registrerar fraktionsskillnader vid påfyllnad av kall schaktugn och då stora temperaturvariationer inträffar (se figur 12–13). Slutsatser som kan dras är att finare råmaterial ger högre dielektricitetskonstant än grövre material. Det är helt enkelt mindre med luft mellan sändare och mottagare. Fuktigt råmaterial ger högre dielektricitetskonstant eftersom vattenmolekyler reagerar kraftigt med elektromagnetiska vågor. Radiomätutrustning skulle kunna användas för att övervaka stenmaterialets kvalitet vid inmatning och uttagning.

Det genomfördes två olika tester för att undersöka sambanden mellan de dielektriska egenskaperna och kalcineringen. Första testet genomfördes på en laboratorieugn där vikt (kalcinering) och temperatur registrerades. Vikt och kalcinering ansågs vara direkt proportionerliga mot varandra. Andra testet genomfördes på Nordkalks schaktugn i Storugns, med främsta syfte att undersöka möjligheterna att installera utrustning och mäta i industriell miljö. I och med att mätdata erhöles för fem veckor så har även dessa data granskats och modellerats.

I nuvarande ugnsovervaknings- och styrsystem för Nordkalks schaktugn i Storugns registreras väggtemperatur. Därutöver görs kemiska analyser var fjärde timme för att övervaka kalcineringsgraden. Dagens ugnsovervaknings- och styrsystem fallerar emellanåt beroende på att mätningarna inte görs direkt i tid och på plats på stenmaterialet. Därför är det inte möjligt att direkt korrigera värmningstid och temperatur under pågående process i relation till kvalitetsvariationer. Det finns också en samplingsproblematik, problem med tidssynkronisering och återkopplingsproblematik. Projektet har visat att det går att ta fram samband utifrån de dielektriska egenskaperna för bestämning av kalcineringen med $\sigma=0,5-1$ procentenheter. Noggrannheten kan öka med mer data, noggrannare referensmätningar, bättre modellering och längre mätperioder.

6.3 Framtid

Radiomätningarna fungerade bra och det går att ta fram ett samband mellan de kemiska reaktionerna (aktivt CaO) och de dielektriska egenskaperna. Trenden för kalcineringen över tid klagörs tydligt i figur 17 (jämför med figur 18). I en skarp installation ska en ny radiomätutrustning användas (DIRP). Den kommer att ge robustare mätningar och bättre resultat. Det kommer dock att behöva göras radiomätningar och referensmätning (temperatur och aktivt CaO) under flera månader för att finkalibrera systemet. Radarbolaget föreslår en skarp installation av radiomätutrustningen på Nordkalks schaktugn i Storugns.